

# Etriyesiz betonarme kirişlerin CFRP levhalarla kesmeye karşı güçlendirilmesi

Gökhan ŞAKAR\*, Ömer Zafer ALKU

Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35160, Buca, İzmir

## Özet

Ülkemizin büyük bölümünün deprem riskini taşıması nedeni ile yapı stoğumuz güçlendirmeye ihtiyaç duymaktadır. Kesme kırılmasının ani ve gevrek özelliği nedeni ile kesme güçlendirmesi daha da önem kazanmaktadır. Günümüzde, fazla sayıda olumlu özellikleri, Lifli Polimer (LP) malzemelerin kesmeye karşı güçlendirmede etkin olarak kullanılmasına neden olmaktadır. Bu makale Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) levhalarla güçlendirilmiş T-kesitli betonarme kirişlerin kesme dayanımlarını artırmaya yönelik deneysel bir çalışma içermektedir. Deneysel çalışma bir adet referans elemanı ve güçlendirme uygulanmış dört adet elemandan oluşmaktadır. Depremi benzeştirebilmek adına kirişlere tersinir-tekrarlanır yükleme uygulanmıştır. Güçlendirilmiş kirişlerde farklı tipte ve uygulama biçiminde LP kullanılmıştır. LP malzemesi tek ve çift doğrultulu olmak üzere iki çeşittir. Tek doğrultulu LP uygulamasında 45°, 60° ve 0–90°'lik uygulama biçimleri seçilmiştir. Son eleman ise çift doğrultulu ve çift katlı LP levhalar ile güçlendirilmiştir. LP'in yüzeyden ayrılmasını engellemek için yeni bir ankraj detayı geliştirilmiş ve kiriş gövdesinin yan yüzeylerinin alt ve üst kısımları ile tablaya uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar kirişlerin dayanım ve davranışlarında referans elemana göre oldukça büyük iyileşmelerin olduğunu göstermiştir. En fazla dayanım artışı çift kat tek doğrultulu levhaların birbirine dik yapıştırıldığı elemanda kaydedilmiştir. Geliştirilen ankraj detayı başarılı olmuş; hem tabla ve gövdenin birbirinden ayrılmasını engellemiş hem de LP levhanın beton yüzeyinden ayrılmasına engel olmuştur. Ayrıca deneysel sonuçlar ACI-440 komisyon raporu kullanılarak analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lifli polimer, kesme güçlendirilmesi, tersinir-tekrarlanır yükleme, ankraj.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Gökhan ŞAKAR. gokhan.sakar@deu.edu.tr; Tel: (232) 412 70 51.

Makale metni 25.07.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.05.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye “Şakar, G., Alku, Ö. Z., (2010) ‘Etriyesiz betonarme kirişlerin CFRP levhalarla kesmeye karşı güçlendirilmesi’, İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 9: 6, 3-12” şeklinde atıf yapabilirsiniz.

## CFRP shear strengthening of reinforced concrete T-beams without stirrups

### Extended abstract

A great number of reinforced concrete (RC) structures constructed in the past are structurally unsafe according to today's design codes in our country. To overcome their poor behaviour and meet the expected requirements, deficient RC structures are in need of strengthening. Shear failure is brittle in nature and it comes without advance warning. Therefore, extra care must be conducted to overcome that unwanted failure. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) is widely preferred to strengthen and upgrade existing structures because of its superior mechanical properties.

This paper presents results of an experimental study conducted on shear strengthening of RC T-section beams with CFRP sheets under cyclic loads. None of the five beams had internal shear reinforcements. Unidirectional and bidirectional CFRP sheets were used in this work. All strengthening scheme was bonded to the sides of the beam. Strengthening was not applied to control specimen K1. K2 was strengthened with two ply unidirectional CFRP sheets. The first ply was applied 45° inclination to the beam axis (45°) and second ply was bonded perpendicular to the first ply (135°). K3 was similar to the K2. K3 was also strengthened with two ply unidirectional CFRP sheets but K3's strengthening scheme was applied 60° and 120° angle to the longitudinal axis of the beam, respectively. K4 was strengthened with two ply unidirectional CFRP. The first ply was bonded parallel to beam axis (0°) and the second ply was bonded perpendicular to the first ply (90°). B4's strengthening procedure was constituted whether it acted like a bidirectional CFRP application or not. K5 was strengthened with two ply bidirectional CFRP.

Shear strengthening of beams may to be problematic since they are cast monolithically with slabs. This phenomenon increases the difficulty of anchoring the FRP at the beam-slab junction and intensifies the risk of deboning failure. However, bonding FRP on both sides, or the sides and the soffit provide some shear strengthening of that kind members. Hence, the different mechanical anchorage detail was developed in this study. Anchorages were included 50x50x5 mm square steel plates, L shaped

50x50x5 mm steel plates and 10 mm diameter threaded rods.

For all tests, cantilever beams were tested under cyclic load. Loading was increased up to the yielding load level or till the failure of the beam. Four linear variable displacement transducer (LVDT) were used to gauge the displacements. Also strain gauges were attached to CFRP surface to measure strains.

To obtain strengthening effect, all strengthened beams were compared with the reference specimen with the help of response envelopes. Response envelopes were drawn by connecting peak points of the loading cycles. A minimum increase of 112% and a maximum of 131% in shear capacity was obtained from the strengthened specimens. K2 and K3 were strengthened two-ply unidirectional CFRP but implementation angle's were different. The results show that 45° and 60° application types had nearly the same strength and behaviour. K4 were strengthened two-ply unidirectional CFRP (0°-90°). To imitate bidirectional CFRP, two perpendicular unidirectional plies were performed to strengthen K4. On the other hand, K5 was strengthened by two-ply bidirectional CFRP. Consequently, K4 and K5 showed similar strength and failure mode.

Strain values can be used to indicate the contribution of CFRP to the shear resistance. It is therefore essential to evaluate the strain activity of the strengthened specimens to determine to contribution. The maximum strain of K4 was 0.0027 mm/mm, which corresponds to 68% of the expected value outlined in the ACI-440 committee report. A low strain level of the specimens can be explained by fewer shear crack propagations, deficient bond or success of the strengthening scheme. Besides, maximum strain value of K5 and K3 exceeded the 0,004 mm/mm, ACI-440 committee report expected value.

The shear resistance due to CFRP was compared to the nominal shear resistance predicted by the ACI-440 committee report. Analytical equations that were suggested by the ACI-440 committee report was denoted the closest results with the specimen that was strengthened with two-ply unidirectional CFRP. The predicted shear capacity for K4 was 9% less than that of the experimental result for ACI-440.

**Keywords:** CFRP, shear strengthening, cyclic load, anchorage.

## **Giriş**

Çok büyük bir bölümü 1. ve 2. derece deprem bölgesi olan ülkemizin yapı stokunun büyük bir kısmı güçlendirmeye ihtiyaç duymaktadır. Kesme kırılmasının ani ve gevrek gelişimi nedeni ile kesmeye karşı güçlendirme kavramı daha da önem kazanmaktadır. 1970'lerde çelik plakalar ile dıştan kesmeye karşı güçlendirme ile başlayan bu süreç günümüze kadar devam etmektedir. Dayanıklılık ve korozyon problemleri, fazla ağır olması, işçilik ve yerleşim problemleri gibi nedenler yüzünden araştırmacılar çelik plakalar yerine daha dayanıklı ve kolay uygulanabilir yöntemler bulma çabasına girmişlerdir. Bu çabalar sonucunda Fiber Reinforced Polymer (FRP) malzemeler yapılarda güçlendirme elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Saadatmanesh ve Ehsani, 1990).

FRP malzemeler aramid (AFRP), glass (GFRP) ve carbon (CFRP) olmak üzere üç tiptedir. Bunlardan en yaygın kullanım alanı olan, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) malzemeler günümüzde belirgin avantajları nedeni ile kesmeye karşı güçlendirme elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlar; yüksek dayanım ve rijitlik, korozyona dayanıklılık, uygulama kolaylığı, ekonomik olması, yüksek yorulma dayanımı olarak sayılabilir (Arduini ve Nanni, 1997).

Kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan CFRP malzemesi ile ilgili literatürde çok fazla sayıda yayın bulunmaktadır. CFRP ile kesmeye karşı güçlendirme çalışmaları sınırlı sayıda olup konu gelişmeye açıktır. Bu çalışmalarda CFRP malzemesinin oldukça etkili ve geçerli bir güçlendirme yöntemi olduğu görülmektedir (Li vd., 2001). Yetersiz kesme donatısı, korozyon nedeniyle donatı alanının azalması, yapıya gelen yüklerin artması gibi sebepler yüzünden kesme açısından yetersiz kalan betonarme kirişler güçlendirilmeye gereksinim duymaktadırlar. Güçlendirme sonucunda elemanların dayanım ve rijitliklerinde önemli artışlar kaydedilmektedir. Davranışı etkileyen genel parametreler; kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı ( $a/d$ ), beton basınç dayanımı, boyuna donatının ve kayma donatısının miktarı ve dayanımı olarak tespit edilmiştir.

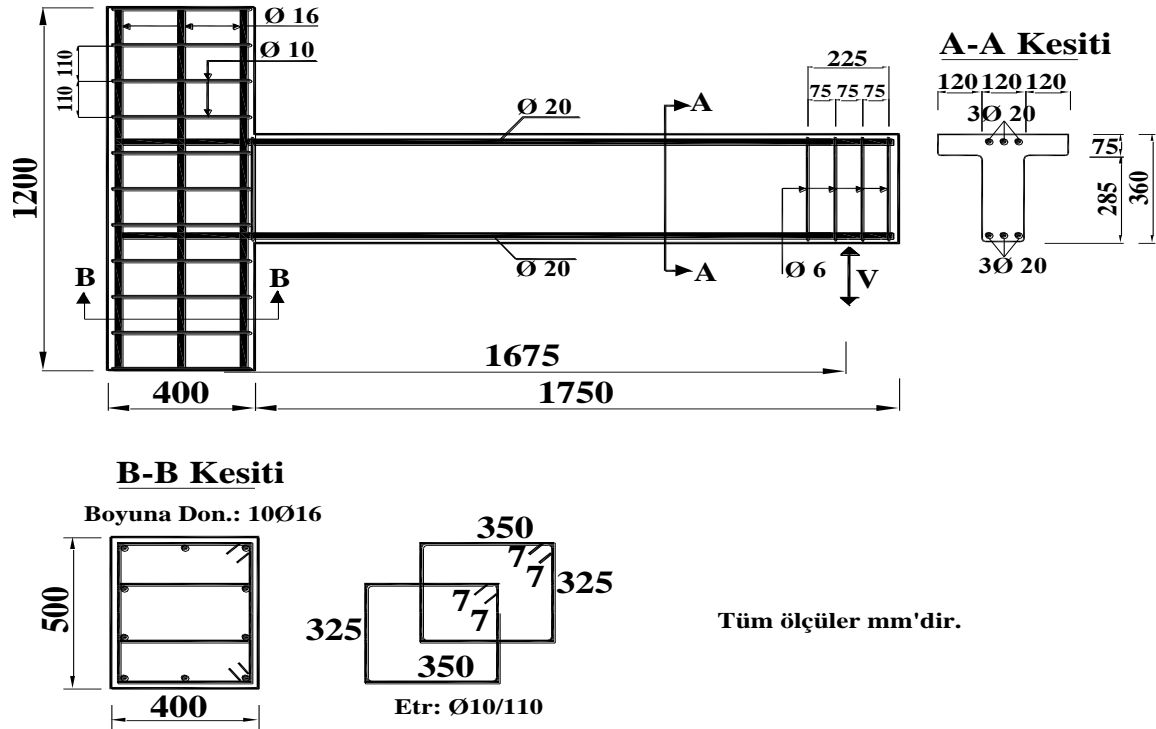
Betonarme bir elemanı kesmeye karşı güçlendirmek eğilmeye karşı güçlendirmekten daha zordur. Çünkü kesme göçmesi, gevrek ve ani bir şekilde gerçekleşmesi nedeni ile eğilme göçmesinden farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükler altında kesmeye karşı yetersiz betonarme kirişlerin test edilmesi, deprem sırasındaki eleman davranışlarını görebilmek adına büyük önem kazanmaktadır.

Literatürde kesmeye karşı lifli polimerler (LP) ile güçlendirilmiş betonarme kirişler için iki göçme moduna yaygın olarak rastlanmaktadır. Bunlar LP'in yüzeyden ayrılması ve LP'in kopması sonucu gerçekleşen iki ayrı göçme modudur (Khalifa ve Nanni, 2002). LP'in yüzeyden ayrılmasını engellemek için ankraj uygulaması yapılması güçlendirmenin etkinliği açısından oldukça yararlı olmaktadır. Bu çalışmada geleneksel ankrajlardan farklı olarak kiriş tablası ile gövdeyi de birbirine bağlayan bir ankraj detayı gerçekleştirilmiş ve tersinir yükler altında bu kirişler test edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında CFRP levhalarla kesmeye karşı güçlendirilmiş T-kesitli betonarme kirişlerin tersinir yükler altında davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Beş adet deney elemanının hepsi etriyesiz üretilmiş ve bir eleman güçlendirilmeyerek referans elemanı olarak seçilmiştir. Hem tek hem de çift doğrultulu LP malzeme çalışmada kullanılmış ve tüm güçlendirmeler kiriş yan yüzlerine uygulanmıştır. Kirişlerin kesme davranışını etkileyen parametreler ve göçme modları çalışma kapsamında irdelenmiştir. Deneysel veriler ACI-440 komisyon raporu ile karşılaştırılarak sonuçların doğrulukları irdelenmiştir.

## **Deneysel program**

Deneysel çalışma kapsamında üretilen beş adet kiriş tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmişlerdir. Kiriş ölçüleri ve kesitler Şekil 1'de görülmektedir. Kiriş alt ve üst yüzünde üç adet 20 mm çapında donatı seçilmiştir. Bu donatının akma dayanımı 414 MPa ve elastisite modülü 205000 MPa'dır. Kesme açıklığı boyunca etriye kullanılmamış, sadece yükleme bölgesinde olası



Şekil 1. Deney kirişlerinin donatı şeması

çatlama ve ezilmeleri önlemek için etriye kullanılmıştır. Kiriş mesnetinde 10 adet 16 mm'lik boyuna donatı ve Ø10/11 cm etriye kullanılmıştır.

Üretilen betonarme kirişlerden dörder adet silindir numune alınmış ve deney günü kırılmıştır. Ortalama beton basınç dayanımı 30 MPa'dır. Tablo 1'de deney elemanlarının özellikleri özetlenmiştir.

Kiriş 1 (K1), güçlendirme etkisini görebilmek için üretilen güçlendirme uygulaması yapılmamış referans elemanıdır. Diğer dört elemanda güçlendirme uygulaması yapılmış ve bu elemanların hepsinde aynı tip ankraj detayı uygulan-

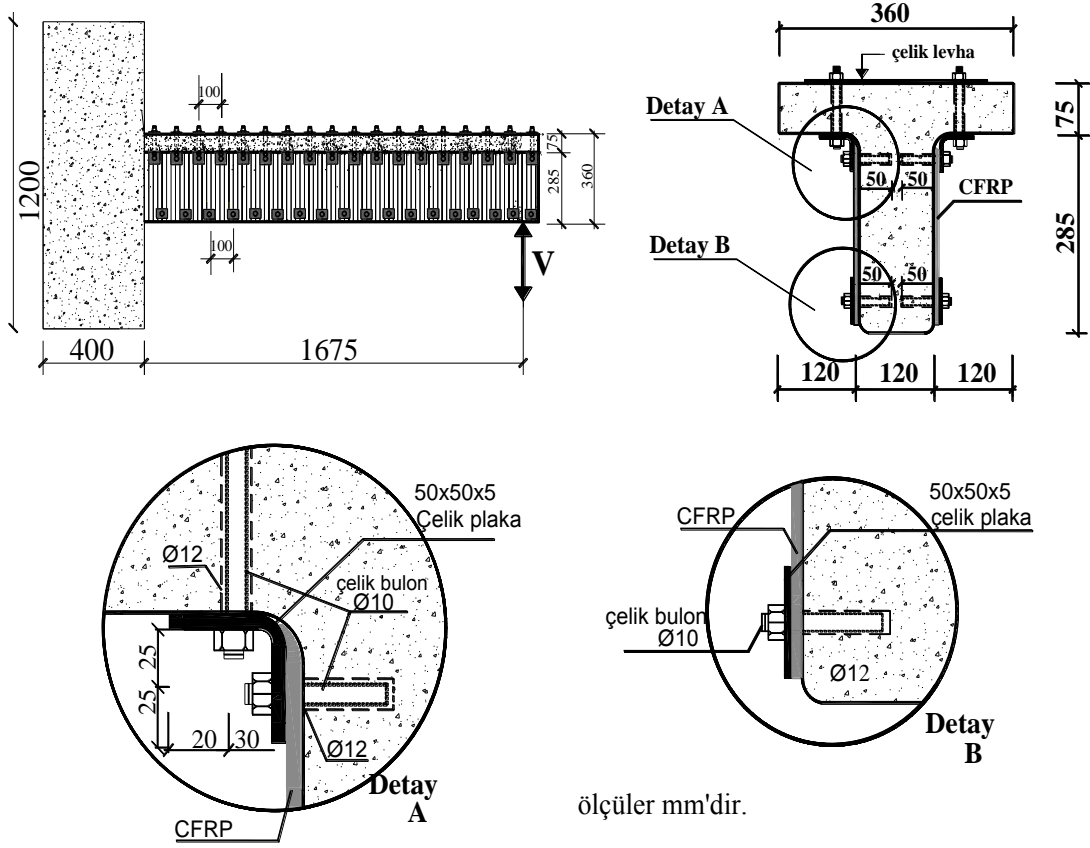
mıştır. Güçlendirme uygulamalarını ve ankraj detaylarını gösteren çizimler Şekil 2'de görülmektedir.

Kiriş 2 (K2), tek yönlü LP ile iki kat uygulama yapılarak güçlendirilmiştir. İlk kat kiriş eksenine 45°, ikinci kat ise 135° açı yapmaktadır. Bu tip bir uygulama yapılarak lif doğrultusunun olası kesme çatlakları ile aynı doğrultuda olması ve bu çatlak gelişimini azaltması ya da geciktirmesi amaçlanmıştır.

Kiriş 3 (K3), K2 ile benzer bir uygulama olup uygulama açısı farklıdır. İlk kat kiriş eksenine 60°, ikinci kat 120° açı yapmaktadır.

Tablo 1. Deney kirişlerinin özellikleri

Deney no		a/d	f <sub>c</sub> (MPa)	LP uygulaması biçimleri			
				Katman sayısı	Biçim	Ankraj	Düzenleme
KİRİŞ 1	Referans	5.0	30.1		-----	-----	-----
KİRİŞ 2	Güçlendirme	5.0	27.9	2	Tek doğrultulu, 45°-135° uygulama	Var	Yan yüzeylere
KİRİŞ 3	Güçlendirme	5.0	29.6	2	Tek doğrultulu, 60°-120° uygulama	Var	Yan yüzeylere
KİRİŞ 4	Güçlendirme	5.0	31.2	2	Tek doğrultulu, 0°- 90° uygulama	Var	Yan yüzeylere
KİRİŞ 5	Güçlendirme	5.0	28.8	2	Çift doğrultulu uygulama	Var	Yan yüzeylere



Şekil 2. Deney kirişlerinin CFRP düzenlemesi ve ankraj detayları

Kiriş 4 (K4), iki katlı tek yönlü LP ile güçlendirilmiştir. İlk kat kiriş eksenine paraleldir. İkinci kat ise kiriş eksenine 90° açı yapmaktadır. Kiriş eksenine paralel uygulamanın amacı, düşey çatlak gelişimini engellemedeki etkisini incelemek ve aynı zamanda bu tip bir uygulamanın çift doğrultulu LP ile benzeşimini araştırmaktır.

Son eleman olan Kiriş 5 (K5), çift doğrultulu ve çift katlı CFRP ile güçlendirilmiştir.

Tüm elemanlara CFRP uygulamaları sadece kiriş yan yüzlerine ve tüm açıklığı kapatacak biçimde levha uygulaması olarak yapılmıştır. Kirişler döşeme ile birlikte monolitik olarak döküldükleri için kesmeye karşı güçlendirilmeleri zorlaşmaktadır. Bu nedenle kiriş-döşeme bölgesinde ankraj uygulama zorluğu artmakta ve LP'in yüzeyden ayrılma riski fazlalaşmaktadır. Bu nedenle çalışmada farklı bir mekanik ankraj detayı geliştirilmiştir (Khalifa vd., 1999).

Ankraj uygulaması için kiriş yan yüzleri 12 mm çapında matkapla 50 mm derinliğinde delinmiş-

tir. Kiriş yan yüzlerinin üst kısmındaki delikler kiriş mesnetinden 50 mm, alt uçtakiler 100 mm uzaklıktan başlayarak 100 mm aralıklarla devam etmektedir. Kiriş tablası da üstteki deliklere karşılık gelecek şekilde boydan boya delinmiştir. Daha sonra kiriş yan yüzündeki deliklere 10 mm çapında yivli çubuklar epoksi yardımı ile ankre edilmiştir. Epoksinin kür almasından sonra tabladan da 10 mm çaplı yivli çubuklar geçirilmiş ve 50 x 50 x 5 mm'lik bir korniyer parçası ile bağlantı sağlanmıştır. Kiriş yan yüzlerinin alt ucunda bulunan ankrajlarda ise yine 50 x 50 x 5 mm'lik bir çelik levha kullanılmıştır (Sakar vd., 2009).

### Güçlendirme uygulaması

Güçlendirme malzemesi olarak Sikawrap 160c (çift doğrultulu) ve Sikawrap 230 c (tek doğrultulu) CFRP levhalar, yapıştırıcı olarak Sikadur 330 epoksi malzemesi kullanılmıştır. LP'in ve epoksinin teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Yüzey hazırlığı olarak önce kumlama yapılarak gözenekler ortaya çıkarılmış, sonrada ba-

sıncılı hava ile yüzeyler temizlenmiştir. Yüzeye 1.5 mm kalınlığında epoksi uygulanmış ve CFRP levhalar yapıştırılmıştır. Boşlukların giderilmesi için lif doğrultusunda basınç uygulanmış ve bir kat daha epoksi sürülmüştür. Tüm örneklerin laboratuvar koşullarında kür alması sağlanmıştır.

Tablo 2. CFRP ve yapıştırıcı özellikleri

CFRP özellikleri	Sikawrap 160c	Sikawrap 230 c
Lif yapısı	%99 ana doğrultuda,%1 destekleyici doğrultuda lifli	%50 ana doğrultuda,%50 destekleyici doğrultuda lifli
Kalınlık (mm)	0.12	0.045
Çekme dayanımı (MPa)	3800	4100
Elastisite modülü (MPa)	230000	231000
En büyük çekme uzaması (%)	1.5	1.7
Sikadur 330 özellikleri		
Çekme dayanımı (MPa)	30	
Elastisite modülü (MPa)	3800	

### Deney düzeneği

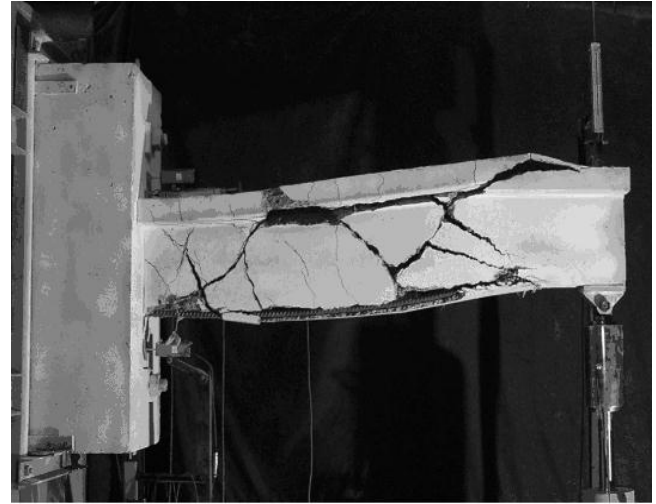
Deneyler Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Hidrolik krika 1000 kN, yük hücresi ise 600 kN kapasitesindedir. Yükleme adımları veri toplayıcı yardımı ile eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Yer değiştirmeler dört adet LVDT yer değiştirme ölçerler ile ölçülmüştür. Bu ölçümler kiriş uç yer değiştirmesini, mesnetteki rijit dönme ve ötelenmeyi hesaplamak için alınmışlardır.

CFRP yüzeyindeki şekil değiştirmeleri ölçmek için birim şekil değişim ölçerler kullanılmıştır. Mesnetten başlayarak yedi adet birim şekil değişim ölçer 150 mm aralıkla kiriş ortalarına yerleştirilmiştir.

### Deney sonuçları

Kesme kuvveti-kiriş uç yer değiştirme eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Tüm güçlendirilmiş deney

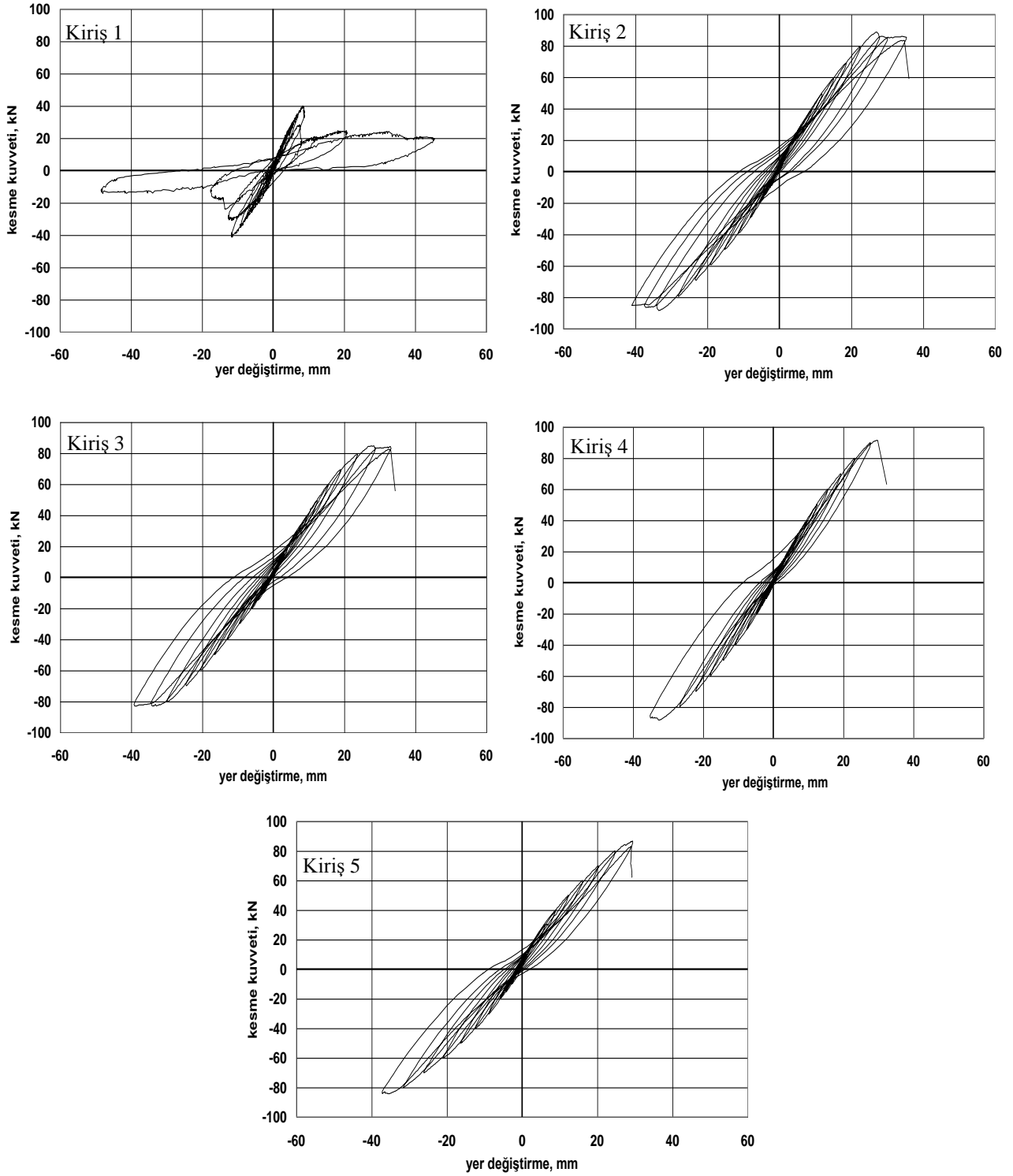
elemanlarının kesme kapasiteleri artmıştır. Malzemenin sünek olmayan yapısı nedeni ile kesme kapasitesi artışına karşın deney numuneleri ani ve gevrek bir kırılma sonucunda göçmeye ulaşmışlardır. 40 kN yük seviyesinde K1 referans elemanı gelişen kesme çatlaklarının sonucunda kesmeden göçmüştür (Şekil 3). Deney kırılgarlığında her ne kadar etriye olmasa da, boyuna donatı düzlemi dışında kalan kısım kabuk betonu olarak nitelendirilmiştir. Tüm güçlendirilmiş deney elemanlarında betonun kabuk kısmının yüzeyden ayrılması sonucunda göçmeye ulaşılmıştır. Ankrajların iyi çalışması nedeni ile LP'in yüzeyden ayrılması gerçekleşmemiştir. Deney elemanlarında deney bitiminde boyuna donatılarda burkulma gözlenmemiştir. Göçme moduna tamamen kesme etkisi hakim olmuştur.



Şekil 3. K1 kirişinin deney sonrası görünümü

K2 kirişinde, ileri ve geri çevrimlerde 86 kN yük düzeyinde alt ve üst boyuna donatılarının akması gerçekleşmiştir. Yer değiştirme kontrolü iki çevrim daha yapıldıktan sonra 83 kN yükte kiriş alt yüzeyinde ankrajların alt kısmında kabuk betonunun yüzeyden ayrılması ile göçme gerçekleşmiştir.

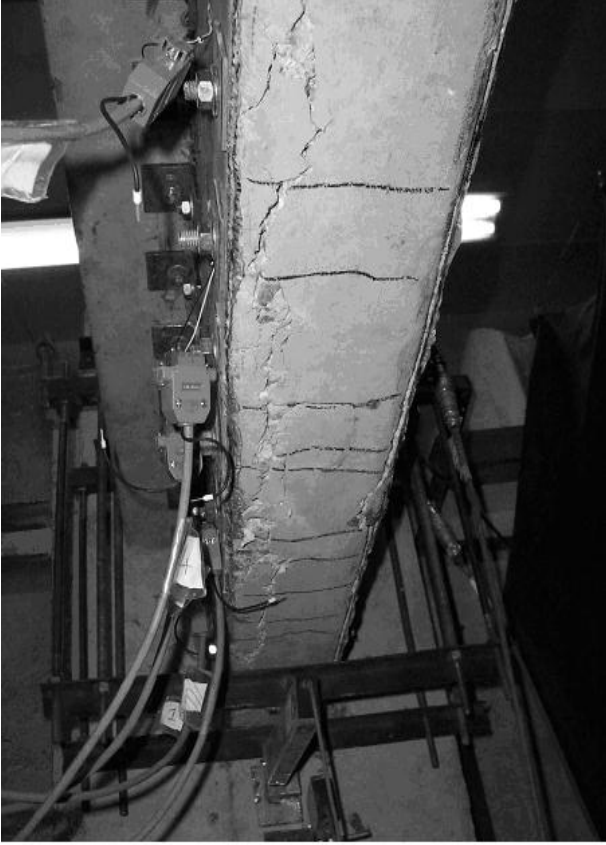
K3 elemanında K2'ye benzer şekilde 83 kN yükte ileri ve geri yüklemede boyuna donatılar akmıştır. Bir çevrim daha yükleme yapıldıktan sonra 81 kN yük düzeyinde kiriş altı kabuk betonun yüzeyden ayrılması ile kiriş göçmüştür. K2 ve K3 elemanları davranış ve dayanım olarak oldukça benzer özellik göstermişlerdir.



Şekil 4. Deney kirişlerinin yük-yer değiştirme eğrileri

K4 elemanında geri yüklemede 88 kN’da boyuna donatının akması görülmüştür. Sonraki çevrimde 91 kN yükte çekme bölgesinde ani gelişen bir çatlakla beton kabuk gövdeden ayrılmış ve kiriş yük taşıma kapasitesini kaybetmiştir (Şekil 5).

K5 kirişinin basınç yüzündeki donatılar 84 kN yükte akmıştır. Takip eden çevrimde 82 kN yük düzeyinde diğer elemanlara benzer şekilde kiriş alt yüzündeki kabuk beton katmanının yüzeyden ayrılmasıyla eleman göçmüştür.



Şekil 5. Kirişlerde kabuk betonunun gövdeden ayrılması ile oluşan göçme modu

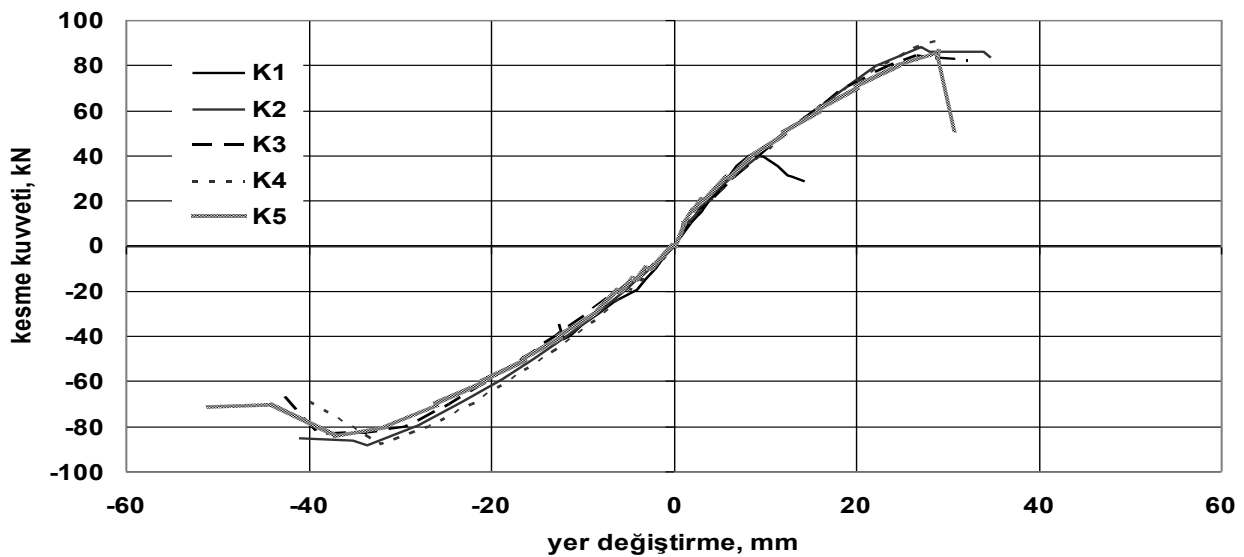
### Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Güçlendirme etkisini daha iyi görebilmek için tüm güçlendirilen kirişler referans elemanla zarf eğrileri yardımı ile karşılaştırılmıştır. Yük çev-

rimlerinin maksimum noktaları kullanılarak oluşturulmuş zarf eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur. Güçlendirilmiş elemanlarda % 112 ile %131 arasında kesme dayanım artışı sağlanmıştır. Tek doğrultulu ve çift katlı CFRP ile güçlendirilen K2 ve K3 elemanlarının farkı LP'in uygulama açılarıdır. 45° ve 60°'lik uygulama açısına sahip bu elemanlar birbirine yakın dayanım ve davranış göstermişlerdir. Çift doğrultulu LP'i benzeştirmek amacıyla yapılan K4 elemanı, K5 kirişi ile benzer dayanım göstermiş ve aynı göçme modunu sergilemiştir.

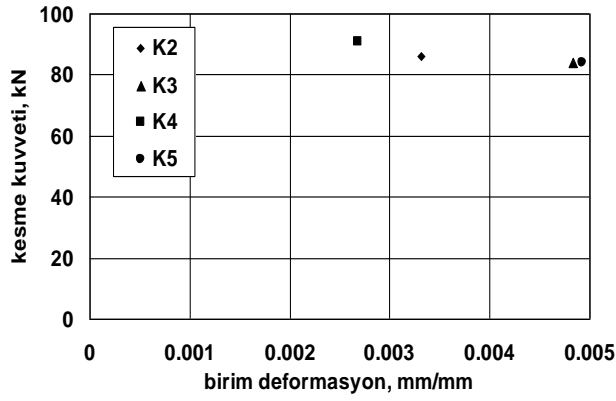
### Yük-birim şekil değiştirme davranışı

Birim şekil değiştirme değerleri LP'in kesme kapasitesine katkısını görebilmek için oldukça önemli veriler sunmaktadır. Şekil 7'de deney elemanlarının en büyük şekil değiştirme değerleri karşılaştırılmaktadır. K4 elemanında ölçülen en büyük birim şekil değiştirme 0,0027 mm/mm'dir. Bu değer ACI-440 komisyon raporunda belirtilen maksimum değer %68'i düzeyindedir (ACI 440, 1996). K4'ün dayanım değeri K5'den %6 fazla olmasına rağmen, maksimum birim şekil değiştirme değeri K5'den %45 daha azdır. Küçük birim şekil değiştirme değerleri kesme çatlağı dağılımından, yetersiz yapışmadan yada başarılı güçlendirme tipinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca K3 ve K5'de oluşan en büyük şekil değiştirme değerleri ACI-440'da belirtilen 0,004 sınır değerini aşmıştır.



Şekil 6. Deney elemanlarının zarf eğrileri





Şekil 7. Deney elemanlarında ölçülen en büyük birim şekil değiştirme değerleri

### Deney sonuçlarının karşılaştırılması ve tasarım denklemleri

CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitesi ACI-440'da belirtilen ifadeye göre hesaplanmıştır. Burada kesme dayanımı sınır birim şekil değiştirme değeri de dikkate alınarak ve çeşitli deneysel katsayılar yardımı ile hesaplanmaktadır. Deneysel ve analitik kesme kuvveti kapasitesi sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 3'de görülmektedir. Tüm tasarım yönetmeliklerinde güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitesi üç ifadenin toplamı olarak verilmektedir;

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

Burada;  $V_c$  betonun katkısı,  $V_s$  kesme donatısının katkısı ve  $V_f$  LP'in kesme kapasitesine olan katkısıdır. Denklem (1) de belirtilen beton ve donatı katkılarının en büyük değerlerini alacağının bir kesinliği yoktur. Bununla birlikte yaygın olarak kullanılan  $t$  yönetmeliklerin ve raporların tümünde bu malzemelerin bağıl katkılarının toplamı, kesme kapasitesini hesaplamakta kullanılmaktadır.

2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te de LP malzemeler ile güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitesini hesaplamaya yönelik bir bölüm eklenmiştir (Deprem Yönetmeliği, 2007). ACI-440 komisyon raporundakine benzer bir ifade ile LP sargının kesme kuvvetine katkısı hesaplanmaktadır.

Tablo 3. Deneysel ve hesaplanan sonuçların karşılaştırılması

Deney No	Deneysel kesme dayanımı (kN)	Hesaplanan kesme dayanımı (ACI-440) (kN)	Deneysel/Hesaplanan
K1	39.5	45.3	0.87
K2	88.5	67.8	1.31
K3	83.7	63.4	1.32
K4	91.4	83.5	1.09
K5	85.7	62.6	1.37

Bu malzemelerin birbiri ile etkileşim içinde olduğu göz ardı edilmemelidir. ACI-440'a göre hesaplanan kesme kapasitesi ile deneysel değerler karşılaştırıldığında en yakın sonuç çift kat tek yönlü güçlendirme uygulanmış elemanda (K4) görülmüştür. İki hesap değeri arasında % 9'luk bir fark vardır. En fazla fark ise çift yönlü CFRP ile güçlendirilen K5 elemanında oluşmuştur.

### Sonuçlar

Deneysel program kapsamında CFRP levhalar ile güçlendirilmiş betonarme T-kesitli etriyesiz kirişler incelenmiştir.

Tüm güçlendirilmiş elemanların dayanımları artmıştır. K4 elemanında referans elemana göre 2.31 katlık bir artış sağlanmış olup en fazla dayanım artışı bu elemandadır.

Geliştirilen ankraj detayı tersinir-tekrarlanır yükler altında başarılı olmuştur. Güçlendirme uygulaması yapılmış elemanlarda kesme donatısı olmamasına rağmen tabla ve gövde birlikte çalışmış, üst ankrajlar kiriş gövdesinin ve tablanın birbirinden ayrılmasını engellemiştir. Ayrıca, üst ve alt ankrajlar LP'in yüzeyden ayrılmasına engel olmuşlardır.

Kiriş eksenine paralel olarak eklenen CFRP katmanının amacı kesme kapasitesine katkısı olup olmadığını bulmaktır. Bu katman ayrıca kesme etkisini artırmakta ve çekme yüzündeki çatlak gelişimini geciktirmektedir. Test sonuçlarına göre, yatay katman kirişin deneysel kesme kapasitesini yükseltmiş ve kesitteki çatlak gelişimini geciktirmiştir.

Analitik ifadeler ile bulunan kesme kapasiteleri kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki fark ankraj etkisinin analitik ifade içerisinde yer almamasından da kaynaklanmaktadır.

LP güçlendirme malzemesi olarak kullanıldığında, beton ve/veya kesme donatısının en büyük dayanımlarını sergilemeleri olası olmayabilir. Fakat yönetmeliklerde ve raporlarda bu durum gözönüne alınmamaktadır. Oluşan büyük şekil değiştirmeler nedeni ile betonun katkısının azalabileceği unutulmamalıdır. Yanlış yaklaşımları engellemek adına LP'in etkin birim şekil değiştirme değeri yönetmeliklerde sınırlanmıştır. Fakat bu çalışmada da görüldüğü üzere bu değer aşılabilmektedir. Bu nedenle bu sınır değerlerin uygunluğunun ve kullanılabilirliğinin araştırılması gerekli olmaktadır.

### Semboller

*a*: Kesme açıklığı

*d*: Kesitin faydalı yüksekliği

*f<sub>c</sub>*: Beton silindirik basınç dayanımı

*L*: Kirişin uzunluğu

*φ*: Donatı çapı

### Kaynaklar

- ACI Committee 440, (1996). State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) reinforcement for concrete structures, *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, 68.
- Arduini, M. ve Nanni, A., (1997). Behaviour of pre-cracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets, *Journal of Composites for Construction*, **1**, 2, 63-70.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007). *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Khalifa, A., Alkhrdaji, T., Nanni, A. ve Lansburg, A., (1999). Anchorage of surface mounted FRP reinforcement, *Concrete International ACI*, **21**, 10, 49-54.
- Khalifa, A. ve Nanni, A., (2002). Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites, *Construction and Building Materials*, **16**, 3, 135-146.
- Li, A., Diagona, C. ve Delmas, Y., (2001). CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams, *Engineering Structures*, **23**, 1212-1220.
- Saadatmanesh, H. ve Ehsani, M., (1990). Fibre composite plates can strengthen beams, *Concrete International ACI*, **12**, 3, 65-71.
- Sakar, G., Tanarlan, H.M. ve Alku, O.Z. (2009). An experimental study on shear strengthening of RC T-section beams with CFRP plates subjected to cyclic load, *Magazine of Concrete Research*, **61**, 1, 43-55.